

炭素鋼の硬化特性とセメンタイト分散形態との関係

村田 基史* 河野 信夫** 小幡谷 洋一***

Correlation between Hardening Characteristic of Carbon Steel and Dispersion of Cementite

Motoshi MURATA, Shinobu KOHNO and Yoichi OBATAYA

(Received Aug. 31, 1999)

Hardening characteristic of carbon steels have been discussed by comparing the flow curves with the shape and distribution of cementite. The complicated microstructure state including lamellar or granular cementite has been quantitatively estimated with one parameter, S_v , in stereology. Magnitude of internal structure variable, A_∞ , capable to express hardening ability has been evaluated from each experimental flow curve in accordance with the random barriers theory. A good correlation between S_v and A_∞ has been found. It is clarified that hardening ability of lamellar cementite is larger than that of granular cementite. These results suggest that the random barriers theory can be applicable for describing any plastic deformation of two-phase alloys.

Key Words : Carbon Steel, Plasticity, Dislocation, Cementite, Random Barriers Theory, Hardening Characteristic

1. 緒言

金属材料の加工硬化特性を正確に把握することは、塑性加工などに関わる変形解析において極めて重要であり、これまでも各種材料の静引張硬化曲線を近似する様々な表示式が提示されている⁽¹⁾。しかし、表示式に含まれる定数と内部組織との関係を系統的に示している場合は少ない。それは、これら表示式が必ずしも金属材料の微視的硬化機構を考慮して導出されたものでない場合が多いためと考えられる。

最近、筆者らは静引張硬化曲線を複合階層塑性変形モデル⁽²⁾に基づいて記述する際の留意点について報告した⁽³⁾。このモデルの中核をなす不規則障害物説^(4,5)では、転位の移動に抗する障害物強度

分布を想定して硬化特性を記述できるものとなっている。したがって、上述の分布特性値と転位密度の関数である内部構造変数とが静引張硬化曲線をもとに評価できる定数となる。しかし、本モデルの適用性に関するこれまでの検討は主に純金属を対象としてきた。

そこでここでは、炭素鋼の加工硬化特性とセメンタイト組織形態との関係を本モデルに基づいて解析し、硬軟二相合金への本モデルの適用性について検討する。炭素鋼の組織は基本的にはフェライト相とセメンタイト相とからなるが、後者は熱処理条件に応じてパーライト中に存在する層状セメンタイトの場合と粒状セメンタイトとして独立分散する場合とがある。ここでは、こうした複雑なセメンタイト相の存在状態をステレオロジー（立体組織学）⁽⁶⁾でのパラメータ S_v を用いて評価し、不規則障害物説での諸特性値と対比検討する。

2. 不規則障害物説での硬化特性値の評価

静引張応力～ひずみ曲線に含まれる基本的な硬化特性を、不規則障害物説においては三つのパラメータ σ_{ys} , m_s および A_∞ を用いて与えることができる。 σ_{ys} と m_s は転位の移動に抗する障害物強度の確率密度分布をワイブル分布としたときの中央値および形状パラメータであり、塑性ポテンシャル関数 $W(\sigma)$ を次式で規制する。

$$W(\sigma) = 2^{(\sigma/\sigma_{ys})^{m_s}} \quad (1)$$

また、 A_∞ は次式で与える内部構造変数 A の大ひずみ領域における収束値である。

$$A = \frac{n_0}{kbN} \quad (2)$$

N は可動転位面密度、 n_0 は障害物線密度、 k は軸ひずみとせん断ひずみの換算係数、 b はバーガースベクトルの大きさである。以上二つの内部状態関数 $W(\sigma)$ と A を用い、塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_p$ は次式で与えられる。

$$d\varepsilon_p = \frac{dW(\sigma)}{A} \quad (3)$$

塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_p$ は塑性ポテンシャルの増分に比例するが、微視的構造状態を反映する内部構造変数 A に反比例する。ここで、 $W(\sigma)$ の微分関数を $f(\sigma)$ とすれば、ひずみ硬化率は次式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} = \frac{A}{f(\sigma)} \quad (4)$$

ここで、

$$f(\sigma) = \left(\frac{m_s \ln 2}{\sigma} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right)^{m_s} 2^{(\sigma/\sigma_{ys})^{m_s}} \quad (5)$$

なお、延性材料での内部構造変数 A は一定の塑性ひずみ履歴（通常 1% 程度）の後、ほぼ一定値 A_∞ に収束するので、ひずみの大きな領域でのひずみ硬化率は次式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} = \frac{A_\infty}{f(\sigma)} \quad (6)$$

実験硬化曲線と式（6）の対比により、当該材料に対する適切な一組の内部状態変数 $[\sigma_{ys}, m_s, A_\infty]$

を決定できる。

3. 引張試験および試験結果

試験に用いた材料は純鉄、機械構造用炭素鋼および炭素工具鋼である。表1にそれぞれの熱処理条件、および島津万能試験機を用いて行ったJIS 4号試験片による主な機械的性質を示す。引張試験はクロスヘッド移動速度を3mm/minとして行った。図1には各試験片の真応力～真ひずみ曲線を示す。各材料とも一定の降伏点伸びの後、硬化挙動を示している。降伏点伸びの大きさはC%に依存するが、ここでの検討対象は硬化挙動を示す領域での曲線である。

塑性ひずみが1～1.5%を越える領域での応力～ひずみ曲線と式(6)との対比によって求めた各材料の内部状態変数 $[\sigma_{ys}, m_s, A_\infty]$ を表2にまとめて示す。なお、同一の実験曲線を同程度に近似

表1 試験片材料の熱処理条件と主な機械的性質

	Fe	S35C	S55C	SK5-1	SK5-2	SK5-3	SK3-1	SK3-2	SK3-3	SK3-4
焼鈍温度 T(K)	※	1133	1093	※	1013	1093	※	1033	1053	1093
上降伏点 σ_{uy} (MPa)	157	341	364	276	363	338	423	485	512	511
下降伏点 σ_{ly} (MPa)	130	295	339	271	333	329	422	460	490	486
引張強さ σ_B (MPa)	265	536	640	576	610	778	688	725	837	859
縦弾性係数 E(GPa)	203	201	204	201	201	201	201	201	201	201
伸び δ (%)	55.0	35.7	26.3	37.9	26.6	15.2	29.6	29.5	21.5	18.5
絞り ϕ (%)	84.4	51.3	45.7	58.1	50.8	24.1	51.4	49.6	38.9	27.2

※は受入れのまま

表2 各材料の内部状態変数

	Fe	S35C	S55C	SK5-1	SK5-2	SK5-3	SK3-1	SK3-2	SK3-3	SK3-4
m_s	1.00	1.26	1.31	1.28	1.29	1.49	1.43	1.44	1.50	1.64
σ_{ys}	73.5	164	202	181	185	262	236	242	289	344
A_∞	130	290	360	323	328	466	419	428	515	610

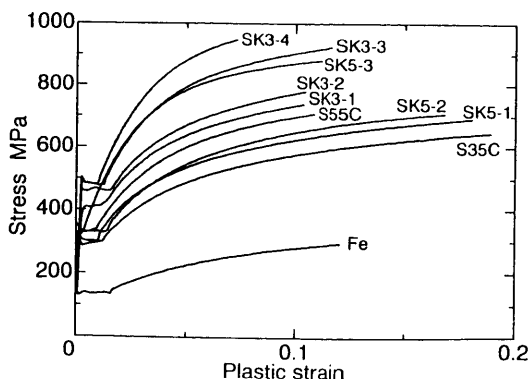


図1 真応力～真ひずみ曲線

できる内部状態変数の組合せは $\sigma_{ys}-m_s-A_\infty$ 空間で1本の曲線で与えられる。図2には各材料に対する A_∞ と σ_{ys} の関係を実曲線で、 A_∞ と m_s の関係を破線で示しており、両曲線の交点より任意の内部構造変数の組合せを得ることができる。したがって、三つの変数のいずれかが既知なら他の二つの変数は自動的に定まる。ここでは純鉄での m_s が1となるよう、 σ_{ys} と A_∞ の比（拘束比）を0.56とした、すなわち図2に一点鎖線で示す直線上の組合せを採用した。

なお、複合階層塑性変形モデルにおいては、以上で得た内部状態変数 $[\sigma_{ys}, m_s, A_\infty]$ を多軸応力下の塑性変形挙動の記述にそのまま適用できることを特に付記しておく。図3にはこれら内部状態変数を用いてシミュレートした降伏点以降の曲線を実験曲線と対比して示す。

図4(a)~(j)に、各試験片の顕微鏡組織を示す。(a)の純鉄では結晶粒界で分けられるフェライトの多結晶組織、また(b)と(c)の炭素鋼ではフェライトとパーライトの混合組織となっている。(d)と(g)はそれぞれSK5材とSK3材の受入れのまものものであり、いずれも粒状セメントライトがフェライト相内に分散していることが分かる。一方、これら工具鋼材をより高温で熱処理した場合の(e), (f), (h), (i)および(j)においては熱処理温度の上昇に応じ、粒状セメントライトが層状セメントライトに移行していることが示されている。炭素鋼の塑性変形は主にフェライト相のすべり変形に依存することより、ここで見られるセメントライトの存在形態の差異は当然ながら硬化特性の差異として現れるはずである。

4. セメントライト存在形態の評価

図4に示した多様なセメントライトの形状と分布状態を量的に表す一つの方法はセメントライト相の存在比率（セメントライト面積率）である。一方、そうした形状と分布は本来空間的なものであるため、ステレオロジー（立体組織学）においては、“単位体積あたりの面”を表現する一つのパラメータ S_v を用いている。ここでは、組織が等方的であると仮定し、ステレオロジーによる以下の手法に

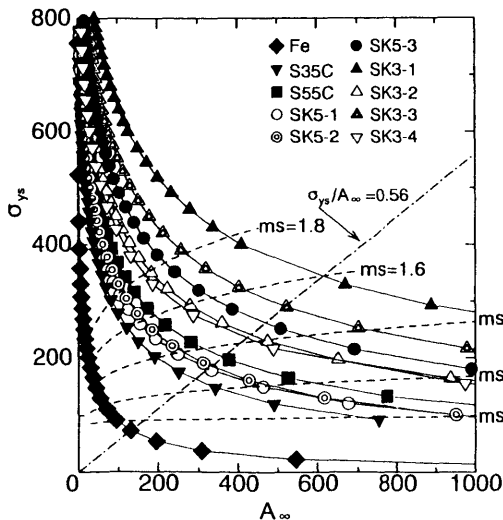


図2 A_∞ と σ_{ys} および m_s の関係

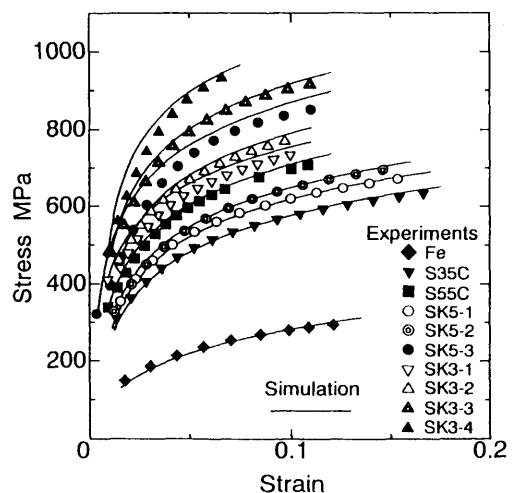


図3 応力～ひずみ曲線

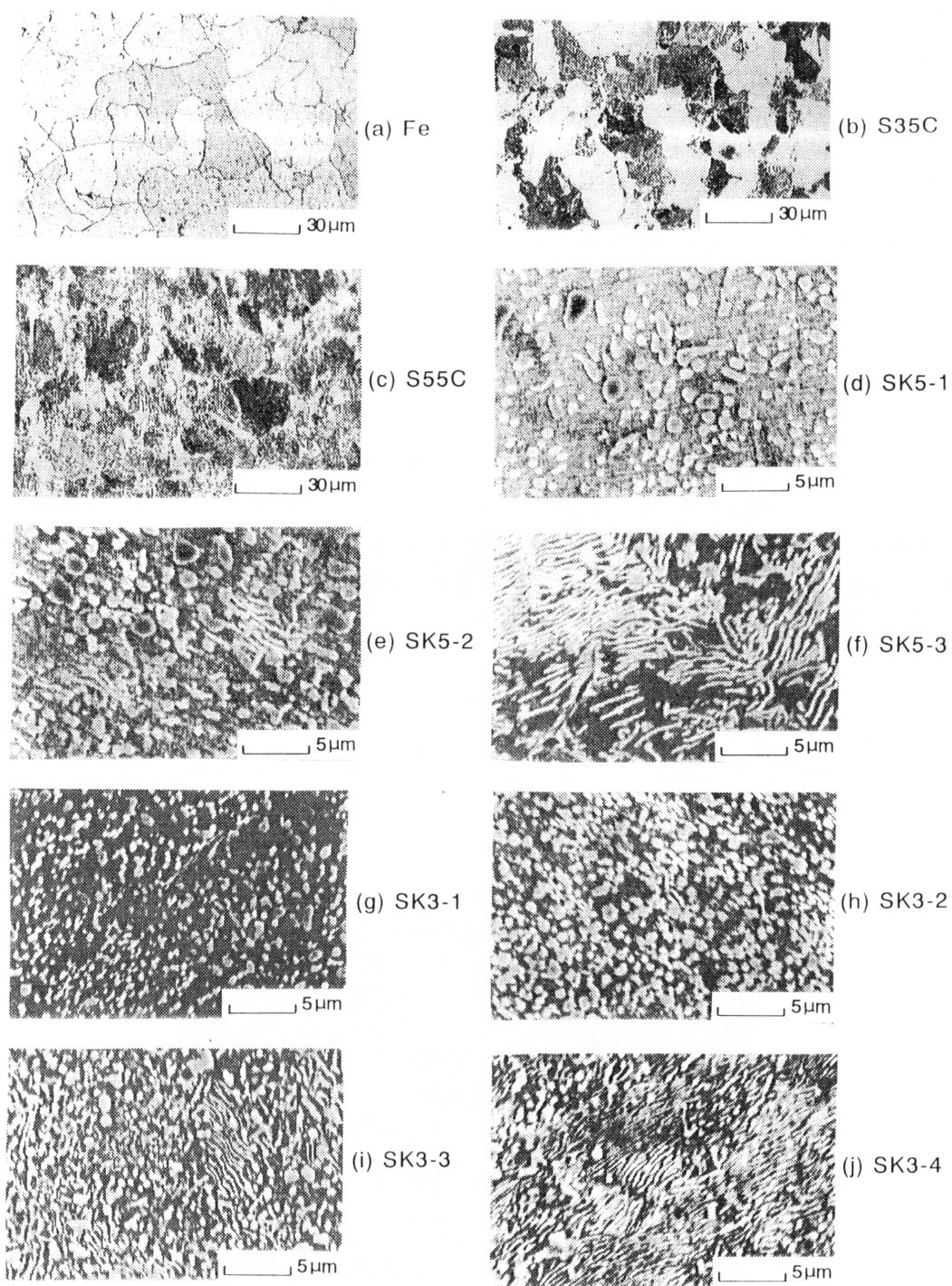


図4 各材料の顕微鏡組織

従って S_v 値を求めた。

図 5 に一例として SK3-3 の顕微鏡組織図を示す。白色部分がセメンタイト相である。

(1) 観察面に任意の線を引く。

図では 23 本の直線を基盤目状に引いており、直線の全長 L は $790\mu\text{m}$ である。

(2) 直線と交差するセメンタイト結晶粒界の全数 N を数える。このとき、直線が

i) 完全交差の場合には 1,

ii) セメンタイト結晶粒界に接した場合には 0.5,

iii) セメンタイト結晶の内側で直線が閉じた場合には 1.5

と数えるものとする。ここでの例では、セメンタイト結晶粒界の数 N_i は 1076 であった。

(3) 上述の値を次式に代入し、 S_v を求める。

$$S_v = \frac{2N_i}{L} \quad (7)$$

ここでは、 $S_v = 72\mu\text{m}$ となる。

以上の評価方法によって得た各材料の S_v 値を表 3 にまとめて示す。図 6 には各試験片の S_v 値と炭素量 (C%) との関係を示すが、SK 材の場合には C% の等しいものは同一材料である。なお、炭素鋼の S35C と S55C の S_v 値については共析鋼に相当する SK5-3 の S_v 値 2.696 にパーライト面積率 (S35C : 0.38, S55C : 0.652) を乗じて得た推定値を用いている。セメンタイトが層状となる

表 3 各材料の S_v 値

	Fe	S35C	S55C	SK5-1	SK5-2	SK5-3	SK3-1	SK3-2	SK3-3	SK3-4
$S_v (\mu\text{m}^{-1})$	0	1.02	1.76	0.921	1.426	2.696	2.034	2.148	2.656	3.614

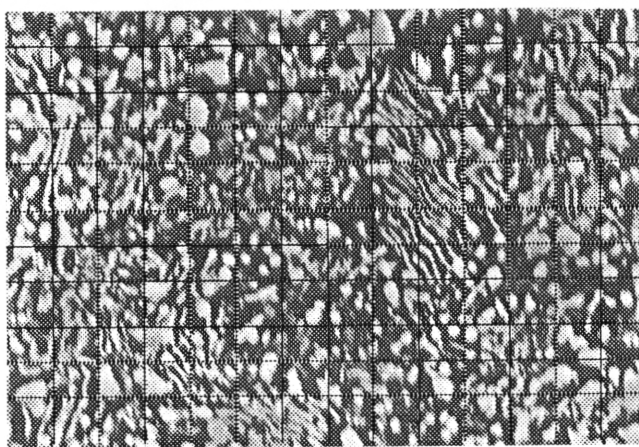


図 5 顕微鏡組織図 (SK3-3)

場合（炭素鋼では通常の焼きなまし、SK 材では高温で熱処理した場合）についての S_v と C% の関係はほぼ直線関係（図中に破線で示す）にあることが分かる。しかし、セメンタイトが粒状となる材料の S_v 値は層状の場合に比べて小さくなっており、ステレオロジーにおけるパラメータ S_v 値にはセメンタイト形態（層状もしくは粒状）の差異が良く反映していると考えられる。

5. 内部構造変数 A_{∞} とパラメータ S_v の関係

図 7 には顕微鏡組織から評価される S_v と硬化曲線より評価した内部構造変数の収束値 A_{∞} との関係を示す。セメンタイトの形状が層状であるか粒状であるかによらず、炭素鋼の硬化特性を規制する内部構造変数 A_{∞} は S_v 値と良好な直線関係（図中の破線）を示している。図中にはセメンタイトを含まない純鉄の S_v 値を 0 として記載しているが、上述の曲線よりややずれている。このことは、結晶粒界とセメンタイト相とではフェライトのすべり変形に及ぼす効果が異なることを示すと考えられるので、今後の検討課題としたい。

なお、SK 材の場合、層状セメンタイトの多いほど S_v 値は増加し、 A_{∞} も増加している。このことは、層状セメンタイトの方が粒状セメンタイトよりも全体としてフェライトのすべり変形に対する抵抗が大きいことを示すものと考えられる。以上のことより、炭素鋼の硬化特性はセメンタイトの存在形態を評価できる S_v 値をもとに、図 7 より内部構造変数の収束値 A_{∞} を推定し、不規則障害物説に従って記述することができる。

6. 結言

鉄－炭素系合金の硬化特性を層状および粒状セメンタイトの存在形態との関係で検討した。顕微鏡組織をステレオロジーにおけるパラメータ S_v で、また硬化特性は不規則障害物説における内部状態変数によって評価し、両者の関係を議論した。その結果、炭素鋼の硬化特性はセメンタイト相が層状で含まれるのか、あるいは粒状で含まれるのかによって明瞭に異なることを示した。同時に、そうした組織の差異がステレオロジーにおけるパラメータ S_v と不規則障害物説における内部状態

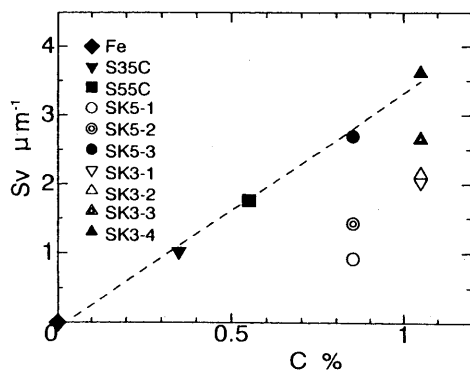


図 6 S_v と C% の関係

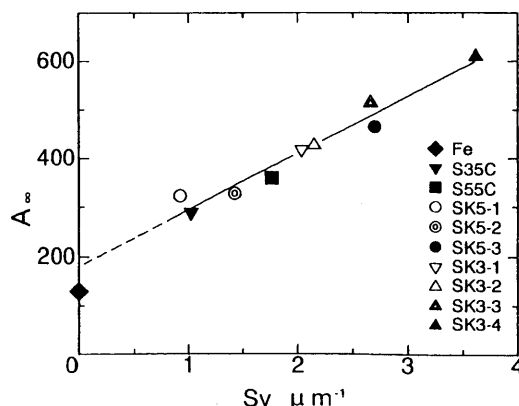


図 7 S_v と A_{∞} との関係

変数に十分良く反映していることを示した。フェライト相の塑性変形に対し、層状セメンタイトが粒状セメンタイトに比べてより大きな変形抵抗を示すことを明らかにした。

文献

- (1) K.P.Rao, S.M.Doraivelu, J. of Mechanical Working Technology, 6-1(1982),63-88.
- (2) 小幡谷, Z.X.Jin, 岡崎, 機械学会論文集, 62-601(1996),2149-2156.
- (3) Y.Obataya, T.Kato, METALS AND MATERIALS, 4-4(1998),648-651.
- (4) 鵜戸口, 岡村, 材料試験, 10-994(1961),994-999.
- (5) 小幡谷, 河野, 機械学会論文集, 51-463(1985),952-960.
- (6) K.J.Kurzydowski, B.Ralph, "The quantitative description of the microstructure of materials", CRC Press(1995).